# Einführung in Visual Computing

186.822

## Wiederholung und Übung

Werner Purgathofer

# Lehrveranstaltungsbewertung

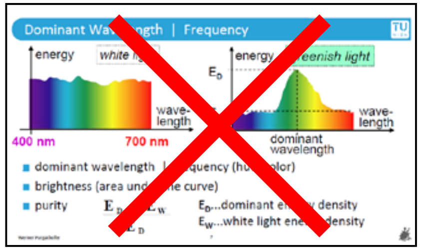
- Studierende werden ersucht, besuchte Lehrveranstaltungen zu bewerten (in TISS).

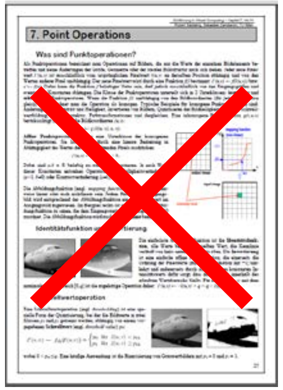
- ich wurde gebeten meine Studierenden daran zu erinnern, sich aktiv an der Lehrveranstaltungsbewertung zu beteiligen.

- Danke!

# Hinweise zum 2. Test

- Montag 19.6. 18 Uhr
- Hörsaaleinteilung ab 16.6. auf Webseite
- *keine* Unterlagen erlaubt:
  - kein Skriptum, keine Folienkopien
  - kein Computer, Tablet, Handy
  - kein programmierbarer Taschenrechner
  - kein Nachbar!
- *einfache* Taschenrechner erlaubt
- Bewertung der wahr/falsch-Fragen:
  - Pluspunkte wenn richtig
  - Minuspunkte wenn falsch
  - aber nie weniger als Null pro Fragenblock







| | | |
|---|---|---|
| richtig | richtig | richtig |
| k.A. | falsch | falsch |
| richtig | richtig | falsch |
| k.A. | k.A. | k.A. |
| 2 Punkte | 1 Punkt | 0 Punkte |

# Reminder: Product of Vectors

$$V_1 = \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{pmatrix} \qquad V_2 = \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{pmatrix}$$

***scalar product:***

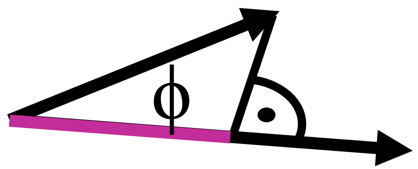
$$V_1 \cdot V_2 = ?$$

***cross product (vector product):***

$$V_1 \times V_2 = ?$$

## *scalar product:*

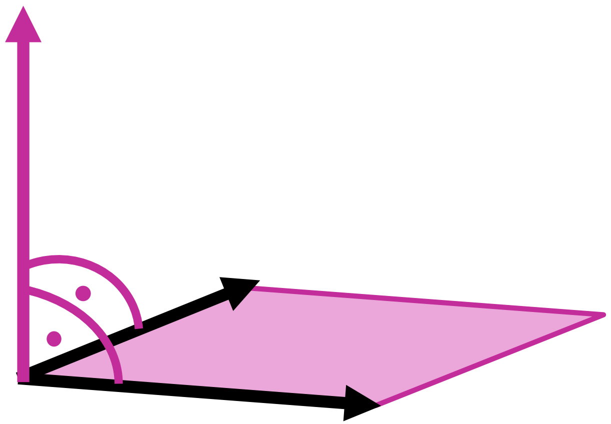
$$V_1 \cdot V_2 = \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{pmatrix} = a_1 a_2 + b_1 b_2 + c_1 c_2$$




$$V_1 \cdot V_2 = |V_1||V_2|\cos\phi$$

## *cross product (vector product):*

$$V_1 \times V_2 = \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 c_2 - c_1 b_2 \\ c_1 a_2 - a_1 c_2 \\ a_1 b_2 - b_1 a_2 \end{pmatrix}$$

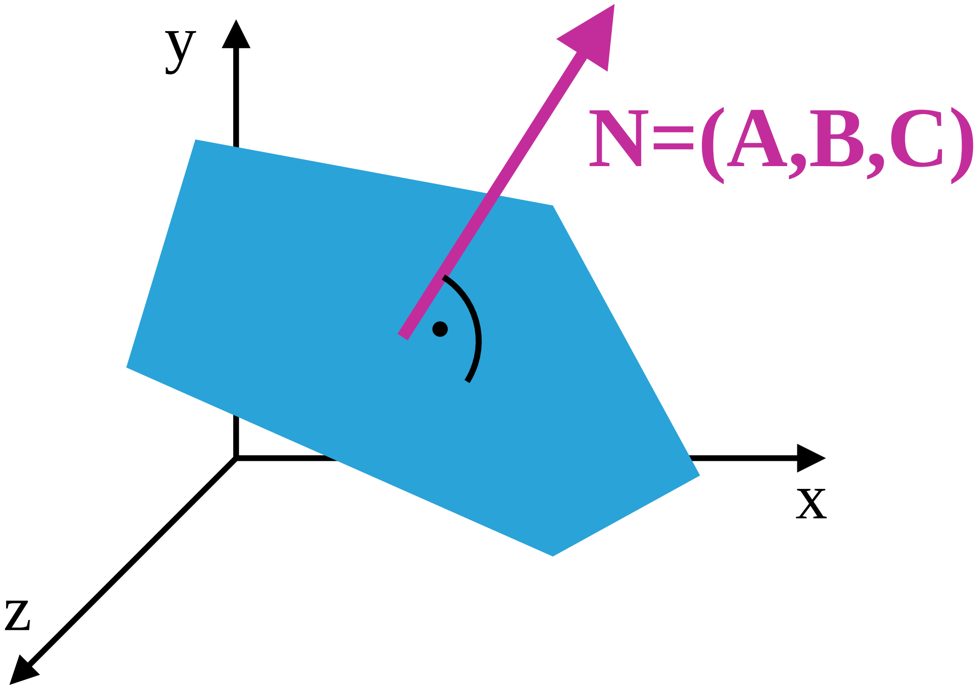


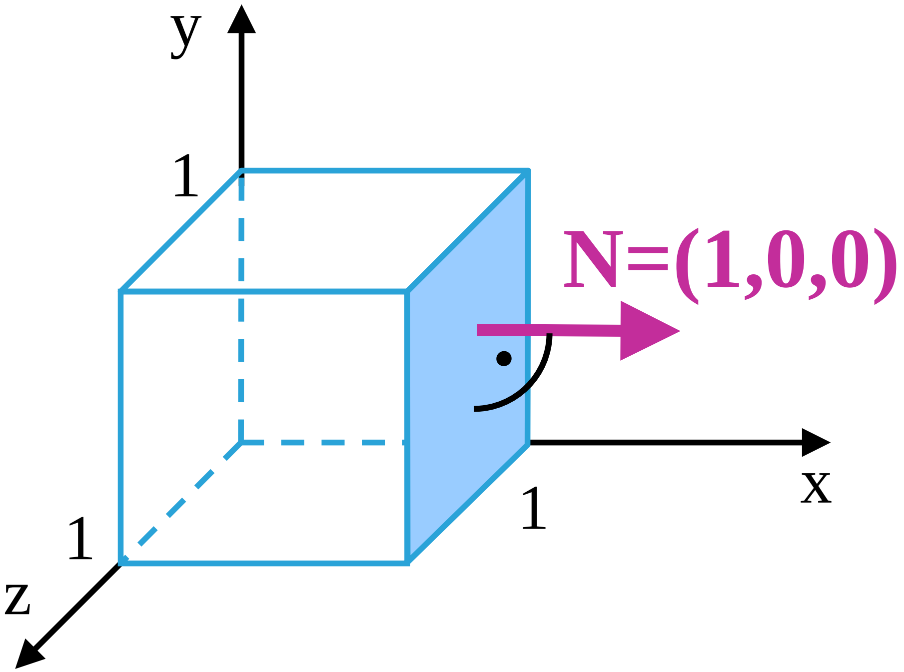
$$|V_1 \times V_2| = |V_1||V_2|\sin\phi$$

# Polygon Surfaces: Plane Equation

$$\boxed{\mathbf{Ax + By + Cz + D = 0}}$$

- plane parameters **A,B,C,D**
- normal (**A,B,C**)



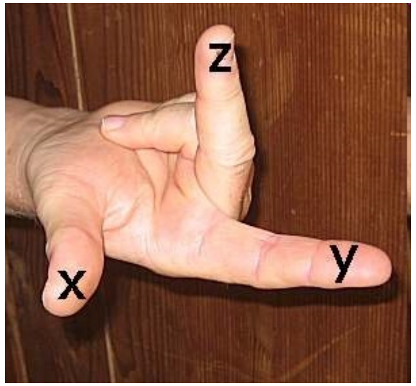



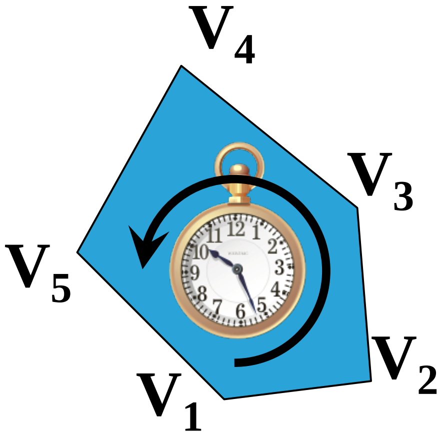
# Front and Back Polygon Faces

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad \text{for points on the surface}$$
$$< 0 \quad \text{for points behind}$$
$$> 0 \quad \text{for points in front}$$

**if** (1) right-handed coordinate system

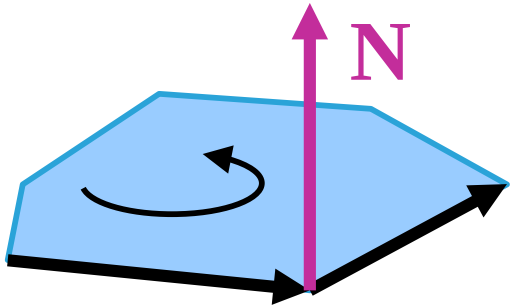
(2) polygon points are ordered counterclockwise




$\mathbf{V_1}, \mathbf{V_2}, \mathbf{V_3}$ counterclockwise $\Rightarrow$

normal vector $\mathbf{N} = (\mathbf{V_2} - \mathbf{V_1}) \times (\mathbf{V_3} - \mathbf{V_2})$



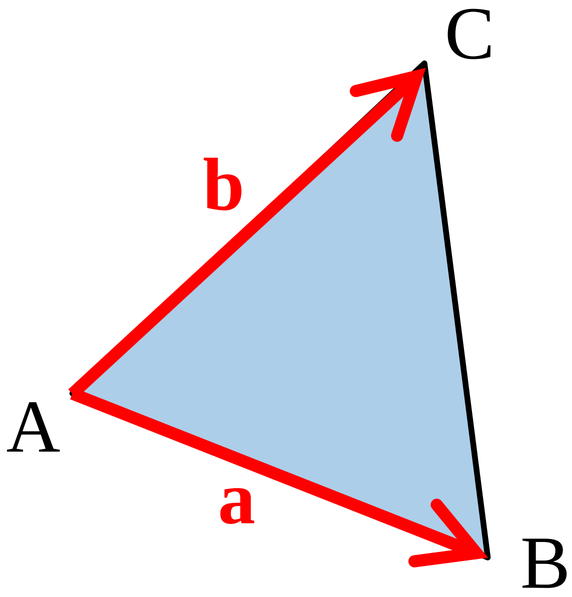
# Beispiel Dreiecksnormale

Wie lautet für ein Dreieck mit den Eckpunkten A(0, 2, 3), B(4, 5, 4), C(5, 4, 3) der normalisierte Normalvektor **n** ?

$\mathbf{a} = B - A = (4, 5, 4) - (0, 2, 3) = (4, 3, 1)$

$\mathbf{b} = C - A = (5, 4, 3) - (0, 2, 3) = (5, 2, 0)$

$$\mathbf{n^*} = \mathbf{a} \times \mathbf{b} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 5 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3\cdot 0 - 1\cdot 2 \\ 1\cdot 5 - 4\cdot 0 \\ 4\cdot 2 - 3\cdot 5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 5 \\ -7 \end{pmatrix}$$




$$|\mathbf{n^*}| = \sqrt{4 + 25 + 49} = \sqrt{78} = 8.83$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{n^*}/|\mathbf{n^*}| = (-2, 5, -7)/8.83 = \underline{\underline{(-0.23, 0.57, -0.79)}}$$

# Beispiel Schattierung

Ein diffus reflektierendes Polygon mit der Trägerebene $2x - 4y + 4z = 1$ wird aus der Richtung $(-2, -2, 1)$ von parallelem Licht der Stärke 7 getroffen. Das Albedo des Polygons ist $0.6$ . Wie hell erscheint das Polygon?

---

Oberflächennormale $\mathbf{n}^* = (2, -4, 4)$ $\quad \mathbf{n} = \mathbf{n}^*/|\mathbf{n}^*| = \mathbf{n}^*/6 = (1/3, -2/3, 2/3)$

Richtung zur Lichtquelle $= (-2, -2, 1)$ $\quad \boldsymbol{\ell} = (-2, -2, 1)/3 = (-2/3, -2/3, 1/3)$

$$L_{diff} = k_d \cdot I \cdot (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\ell})$$

$$L_{diff} = 0.6 \cdot 7 \cdot (-2/9 + 4/9 + 2/9) = 4.2 \cdot 4/9 = \underline{\underline{1.867}}$$

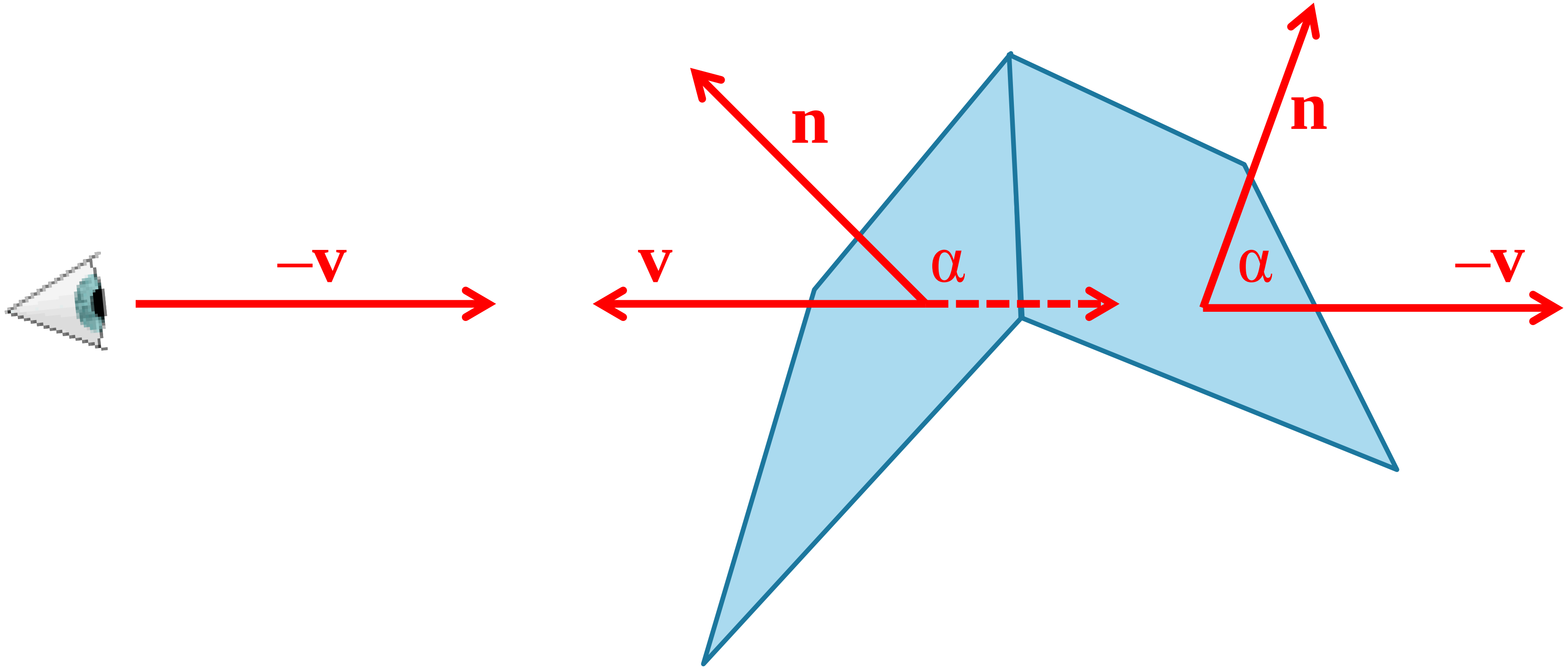
# Beispiel Schattierung

Gegeben sind drei diffuse Dreiecke mit den Oberflächennormalen $(\sqrt{3}, 0, 1)$, $(-3, 3, 3)$, $(1, -1, -2)$ und parallel einfallendes Licht aus der Richtung $(0, 0, 1)$ mit der Intensität $I_L = 128$. Der diffuse Reflexionskoeffizient des 1. Dreieckes ist $k_d=0.75$, der des 2. und 3. ist $k_d=0.25$ . Das ambiente Licht hat die Stärke $12$. *Berechnen Sie die Intensitäten $I_i$ des reflektierten Lichtes, das ein Beobachter aus der Richtung $(1, 0, 0)$ von den 3 Dreiecken sieht.*

# Skizze zum Schattierungsbeispiel

$\alpha < 90° \rightarrow$ nicht sichtbar $[\ (-v) \cdot n > 0$ oder $v \cdot n < 0\ ]$

$\alpha > 90° \rightarrow$ sichtbar $[\ (-v) \cdot n < 0$ oder $v \cdot n > 0\ ]$



# Beispiel Schattierung

Gegeben sind drei diffuse Dreiecke mit den Oberflächennormalen $(\sqrt{3}, 0, 1)$, $(-3, 3, 3)$, $(1, -1, -2)$ und parallel einfallendes Licht aus der Richtung $(0, 0, 1)$ mit der Intensität $I_L = 128$. Der diffuse Reflexionskoeffizient des 1. Dreieckes ist $k_d=0.75$, der des 2. und 3. ist $k_d=0.25$ . Das ambiente Licht hat die Stärke $12$. *Berechnen Sie die Intensitäten $I_i$ des reflektierten Lichtes, das ein Beobachter aus der Richtung $(1, 0, 0)$ von den 3 Dreiecken sieht.*

---

cos (Normale, Lichtrichtung) =

$(\sqrt{3}, 0, 1)/2 \cdot (0, 0, 1) = ½$

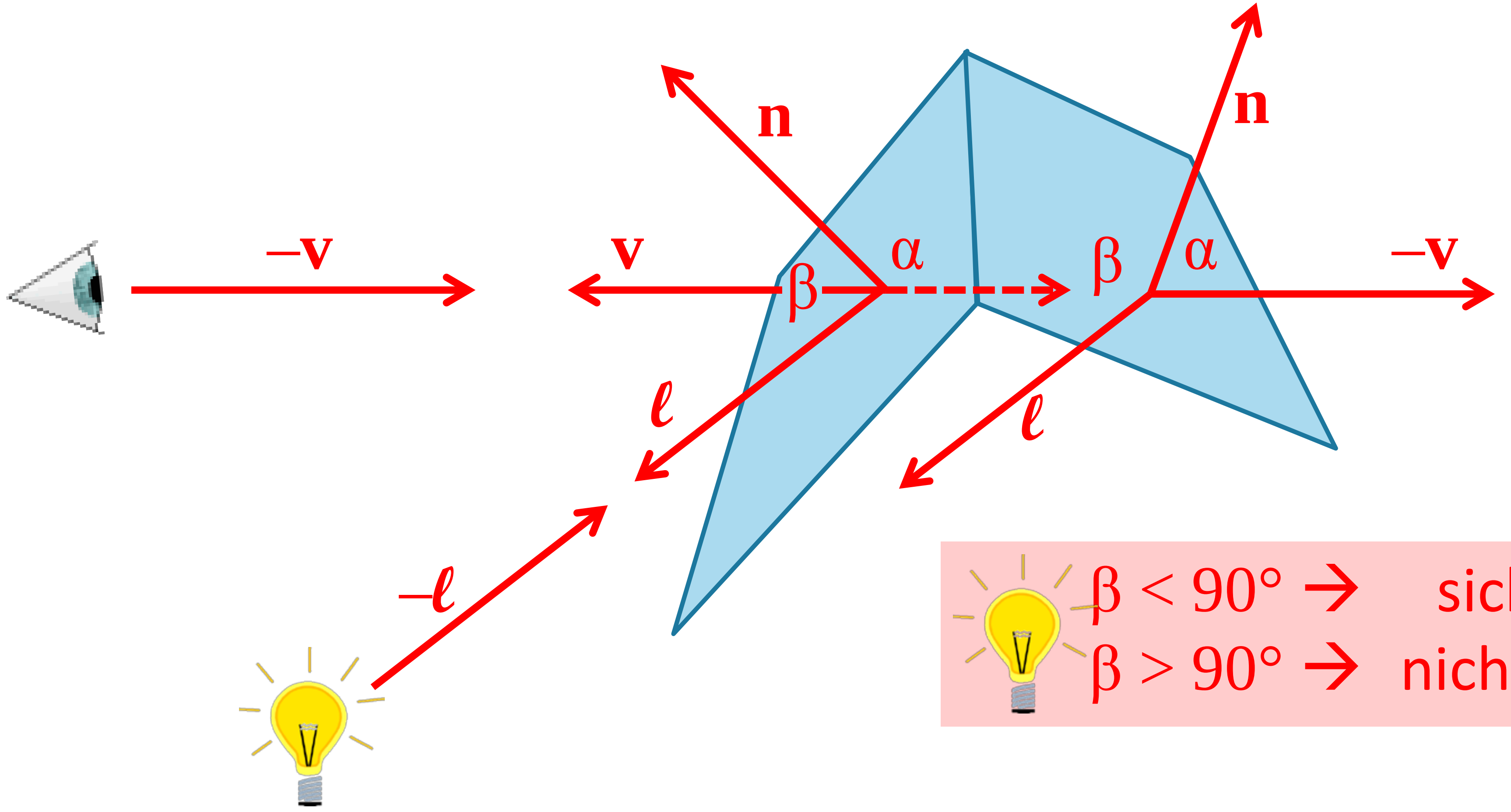
daher $I_1 = 12 \cdot 0.75 + 128 \cdot 0.75 \cdot 0.5 = \underline{\underline{57}}$

$(-3, 3, 3) \cdot (1, 0, 0) = -3 < 0$

# Skizze zum Schattierungsbeispiel

$\alpha < 90° \rightarrow$ nicht sichtbar $[\ (-v) \cdot n > 0$ oder $v \cdot n < 0\ ]$

$\alpha > 90° \rightarrow$ sichtbar $[\ (-v) \cdot n < 0$ oder $v \cdot n > 0\ ]$




$\beta < 90° \rightarrow$ sichtbar $[\ \ell \cdot n > 0\ ]$

$\beta > 90° \rightarrow$ nicht sichtbar $[\ \ell \cdot n < 0\ ]$

# Beispiel Schattierung

Gegeben sind drei diffuse Dreiecke mit den Oberflächennormalen $(\sqrt{3}, 0, 1)$, $(-3, 3, 3)$, $(1, -1, -2)$ und parallel einfallendes Licht aus der Richtung $(0, 0, 1)$ mit der Intensität $I_L = 128$. Der diffuse Reflexionskoeffizient des 1. Dreieckes ist $k_d=0.75$, der des 2. und 3. ist $k_d=0.25$ . Das ambiente Licht hat die Stärke 12. *Berechnen Sie die Intensitäten $I_i$ des reflektierten Lichtes, das ein Beobachter aus der Richtung $(1, 0, 0)$ von den 3 Dreiecken sieht.*

---

cos (Normale, Lichtrichtung) =

$(\sqrt{3}, 0, 1)/2 \cdot (0, 0, 1) = \frac{1}{2}$ daher $I_1 = 12 \cdot 0.75 + 128 \cdot 0.75 \cdot 0.5 = \underline{\underline{57}}$

$(-3, 3, 3) \cdot (1, 0, 0) = -3 < 0 \rightarrow$ $(-3, 3, 3)$ ist aus $(1, 0, 0)$ nicht sichtbar!

$(1, -1, -2) \cdot (0, 0, 1) = -2 < 0$

# Fragen zu Ray Tracing

- Mit dem Ray-Tracing-Verfahren ist es nicht möglich, einfache Schatten zu berechnen.
- Lässt man alle Blickstrahlen von einem Punkt ausgehen, so wird das Bild in Perspektive gerendert.
- Die Basisidee beim Ray-Tracing besteht darin, Licht, welches auf einen Bildpunkt trifft, zurückzuverfolgen und daraus auf das Aussehen (Farbe) dieses Bildpunktes zu schließen.
- Ray-Tracing kann – zum Beispiel – Spiegelungen und Lichtbrechung simulieren.

# Beispiel Ray-Tracing

Ein Strahl $\mathbf{p}(t) = (1, -2, -6) + t\cdot(1, 2, 3)$ trifft die Kugel K mit Mittelpunkt $(6, 0, 0)$ und Radius $r = 5$. *Berechnen Sie den **Normalvektor im Schnittpunkt**.*

$$ax^2 + bx + c = 0$$

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Kugel: $((x, y, z) - (6, 0, 0))^2 = 25$

$((1, -2, -6) + t\cdot(1, 2, 3) - (6, 0, 0))^2 = 25$

$(t\cdot(1, 2, 3) + (-5, -2, -6))^2 = 25$

$14t^2 + 2\cdot(-27)t + 65 = 25$

$14t^2 - 54t + 40 = 0$ also $7t^2 - 27t + 20 = 0$

$t_{1,2} = (27 \pm \sqrt{(27^2 - 4\cdot 7\cdot 20)})/2\cdot 7 = (27 \pm \sqrt{(729 - 560)})/14 = (27 \pm 13)/14$

$t_1 = 1$ $t_2 = 40/14$ also 1. Schnittpunkt $\underline{\underline{(2, 0, -3)}}$

also $\mathbf{n}^* = (2, 0, -3) - (6, 0, 0) = (-4, 0, -3)$

bzw. $\mathbf{n} = \mathbf{n}^*/|\mathbf{n}^*| = (-4, 0, -3)/5 = \underline{\underline{(-4/5, 0, -3/5)}}$

# Beispiel Ray-Tracing - Fortsetzung

Ein Strahl $\mathbf{p}(t) = (1, -2, -6) + t \cdot (1, 2, 3)$ trifft die Kugel K mit Mittelpunkt $(6, 0, 0)$ und Radius $r = 5$. *Berechnen Sie den **Reflexionsstrahl**.*

---

$\mathbf{r} = (2\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} - \mathbf{v}$

Strahl: $(1, -2, -6) + t \cdot (1, 2, 3)$ also $\mathbf{v} = (-1, -2, -3)/\sqrt{14} = (-0.27, -0.53, -0.80)$

Schnittpunkt: $(2, 0, -3)$

Normalvektor: $\mathbf{n} = (-4/5, 0, -3/5)$

$\mathbf{r} = (2 \cdot (4/5 + 0 + 9/5)/\sqrt{14}) \cdot \mathbf{n} - \mathbf{v} = 1.39 \cdot \mathbf{n} - \mathbf{v} = (-0.84, \ 0.53, -0.03)$

$\underline{\underline{R(t) = (2, 0, -3) + t \cdot (-0.84, 0.53, -0.03)}}$

# Fragen zu Radiosity

- ✗ Die Radiosity-Methode eignet sich sehr gut dazu, Objekte mit diffusen und spiegelnden Oberflächen darzustellen.
- ✓ Beim Southwell-Verfahren (Shooting-Verfahren) wird in einem Schritt die Energie des hellsten Patches auf alle anderen verteilt, weshalb es schneller konvergiert als das Gauß-Seidel-Verfahren.
- ✓ Die Formfaktoren sind rein geometrische Größen, also unabhängig von Lichtquellen und Radiositywerten.
- ✗ Radiosity ist eine blickpunktabhängige Methode zur Berechnung der Helligkeit der einzelnen Patches.

Gegeben ist eine Szene mit 2 Lichtquellenpatches $L_1$ und $L_2$. *Berechnen Sie für das nicht selbstleuchtende Patch $P$ die Radiosity nach einem Shooting-Schritt.*

Flächen: $A_1 = 20,\ A_2 = 25,\ A_P = 30$

Eigenemissionen: $E_1 = 125,\ E_2 = 83,\ E_P = 0$

Formfaktoren: $F_{12} = 0.02,\ F_{1P} = 0.03,\ F_{2P} = 0.04$

Reflexionskoeffizienten: $\rho_1 = 0.6,\ \rho_2 = 0.4,\ \rho_P = 0.8$

Diese 3 Patches stehen jeweils um 30° geneigt zueinander.

---

$L_1$ ist die hellere Lichtquelle weil $E_1 \cdot A_1 > E_2 \cdot A_2$

also $i = 1,\ j = P$

$$\boxed{B_{j\text{ due to }B_i} = \rho_j B_i F_{ij} \frac{A_i}{A_j}}$$

$B = 0.8 \cdot 125 \cdot 0.03 \cdot 20/30 = \underline{\underline{2}}$

# Beispiel Natural Cubic Splines

Gesucht: Natural Cubic Spline-Segment mit den Stützpunkten: $P_1\ (0,0)$, $P_2\ (2,-4)$.
Weiters ist gegeben: Anstieg in $P_2$ ist 4, die zweite Ableitung am Punkt $P_2$ ist 2.
Wie lautet die explizite Form des Polynoms, d.h. die Form
$p(x) = ax^3+bx^2+cx+d$ mit 4 Koeffizienten pro Segment?

---

$p(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$ $\qquad p'(x) = 3ax^2 + 2bx + c$ $\qquad p''(x) = 6ax + 2b$

$p(0) = 0 \qquad 0 = d$

$p(2) = -4 \qquad -4 = 8a + 4b + 2c\ (+\ d)$

$p'(2) = 4 \qquad 4 = 12a + 4b + c$

$p''(2) = 2 \qquad 2 = 12a + 2b$

$\left.\begin{matrix} 4 = 12a + 4b + c \\ 2 = 12a + 2b \end{matrix}\right\}\ 2 = 2b + c$

$\left.\begin{matrix} -4 = 8a + 4b + 2c \\ 2 = 2b + c \end{matrix}\right\}\ -4 = 8a + 4$

$-8 = 8a$

$-1 = a$

$2 = -12 + 2b$

$14 = 2b$

$7 = b$

$4 = -12 + 28 + c$

$-12 = c$

$\underline{\underline{p(x) = -x^3 + 7x^2 - 12x}}$

# Beispiel Hermite Spline

Gesucht ist die parametrische Form eines Hermite Spline Segmentes. Die parametrische Form ist eine Vektorgleichung $\mathbf{P}(u) = \mathbf{a}u^3+\mathbf{b}u^2+\mathbf{c}u+\mathbf{d}$ mit 4 Koeffizientenvektoren pro Segment. Gegeben sind die folgenden Stützpunkte: $P_1$ $(-3,7)$, $P_2$ $(2,4)$, und folgende Tangentensteigungen: in $P_1$: $(1,1)$, in $P_2$: $(6,-2)$.

---

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_k \\ \mathbf{b}_k \\ \mathbf{c}_k \\ \mathbf{d}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_k \\ \mathbf{p}_{k+1} \\ \mathbf{Dp}_k \\ \mathbf{Dp}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_k \\ \mathbf{p}_{k+1} \\ \mathbf{Dp}_k \\ \mathbf{Dp}_{k+1} \end{bmatrix}$$

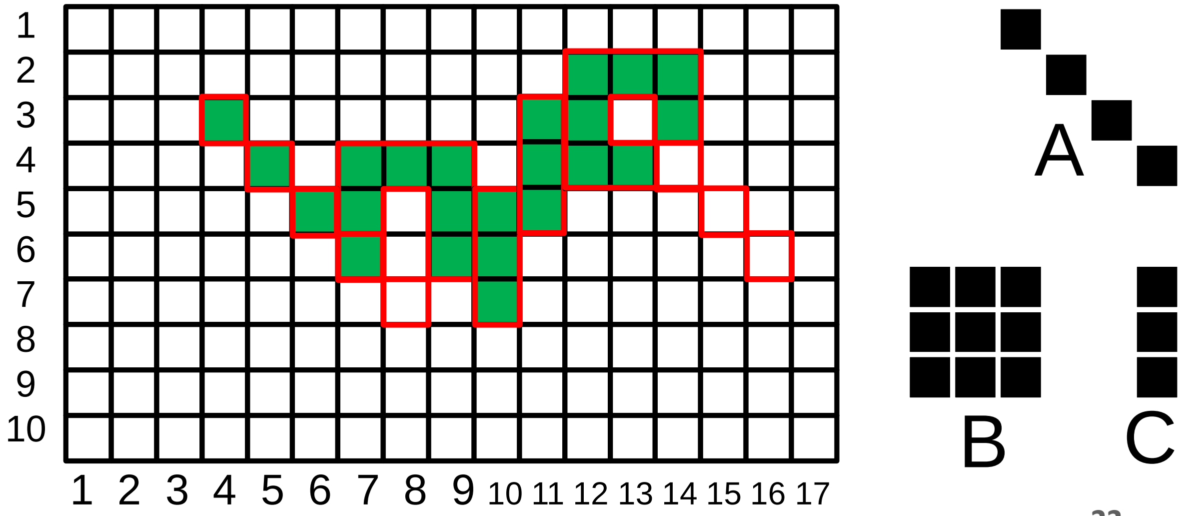
$$\begin{aligned} \mathbf{a}_k &= 2\mathbf{p}_k - 2\mathbf{p}_{k+1} + \mathbf{Dp}_k + \mathbf{Dp}_{k+1} \\ \mathbf{b}_k &= -3\mathbf{p}_k + 3\mathbf{p}_{k+1} - 2\mathbf{Dp}_k - \mathbf{Dp}_{k+1} \\ \mathbf{c}_k &= \mathbf{Dp}_k \\ \mathbf{d}_k &= \mathbf{p}_k \end{aligned}$$

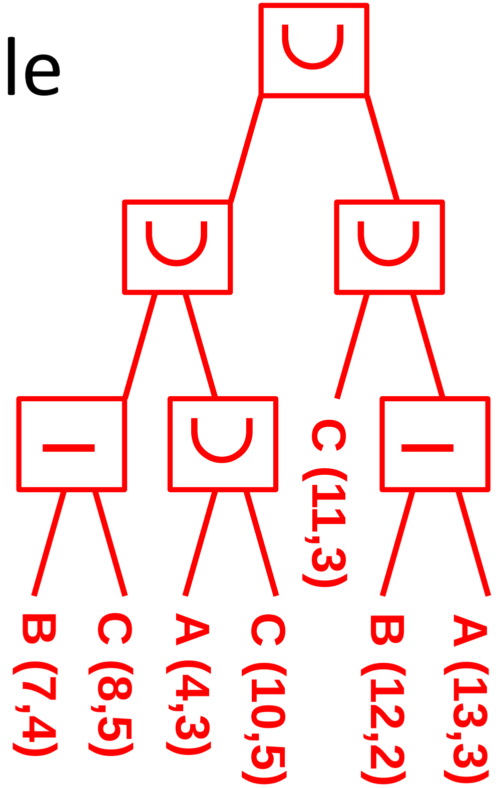
$$\begin{aligned} \mathbf{a}_k &= (-3, 5) \\ \mathbf{b}_k &= (7, -9) \\ \mathbf{c}_k &= (1, 1) \\ \mathbf{d}_k &= (-3, 7) \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{\mathbf{P}(u) = (-3, 5)u^3 + (7, -9)u^2 + (1, 1)u + (-3, 7)}}$$

# Beispiel CSG

- Skizzieren Sie einen 2D-CSG-Baum, der die angegebene Fläche mit möglichst wenigen Endknoten repräsentiert.
- Endknoten = ausschließlich Fig. A, B, C, nicht rotiert oder skaliert, nur verschoben, durch die 3 CSG-Operationen verbunden
- Geben Sie im CSG-Baum die Platzierung der Teile in Koordinaten der linken oberen Ecke an



# Fragen zu Antialiasing

- ✗ Aliasing-Artefakte sind Fehler, die bei der Umwandlung (Diskretisierung) von digitalen in analoge Informationen auftreten können.
- ✓ Eine zu geringe Auflösung bei der Rasterisierung kann zu Aliasing-Artefakten führen.
- ✓ Numerische Fehler können zu Aliasing-Artefakten führen.
- ✓ Die Abtastfrequenz muss mindestens doppelt so hoch sein wie die höchste zu übertragende Informationsfrequenz um die Information des abgetasteten Signals korrekt rekonstruieren zu können.
- ✓ Unter Antialiasing versteht man die Reduktion unerwünschter Aliasing-Artefakte.
- ✓ Supersampling/Oversampling ist eine zentrale Strategie beim Vorfiltern.

# Fragen zu Sichtbarkeit

- ✓ Beim Backface-Culling wird ein Polygon entfernt, wenn sein Oberflächennormalvektor vom Betrachter wegzeigt.
- ✗ Mittels Backface-Culling können alle nicht sichtbaren Polygone einer Szene entfernt werden (meist etwa 50% aller Polygone).
- ✓ Mittels Backface-Culling können im Schnitt in etwa die Hälfte aller Polygone einer Szene als unsichtbar identifiziert werden.
- ✗ Der Z-Puffer speichert für jedes Pixel stets die Tiefe des am fernsten liegenden Polygons, das dieses Pixel überdeckt.

# Fragen zu Sichtbarkeit - Fortsetzung

- Beim Ray-Casting wird durch jedes Pixel ein Strahl in Blickrichtung in die Szene gelegt und mit allen Objekten geschnitten.
- Beim z-Buffering wird im Framebuffer ein Pixel eines Polygons nur gezeichnet, wenn sein z-Wert näher zum Betrachter liegt als der im z-Puffer gespeicherte Wert.
- Ein Nachteil von Ray-Casting ist der hohe Speicherbedarf, der durch die vielen Rays (bis zu mehreren Millionen) entsteht.

# Klassifizierung von Sichtbarkeitsverfahren

Welche der folgenden Sichtbarkeitsverfahren arbeiten im Objektraum, welche im Bildraum?

| | Objektraumverfahren | Bildraumverfahren |
|---|---|---|
| Z-Buffer | O | X |
| Depth-Sorting | X | O |
| Area Subdivision | O | X |
| Backface Detection | X | O |
| Octree-Methode | X | O |
| Ray Casting | O | X |
| Scanline-Methode | O | X |

# Fragen zu Kurven und Flächen

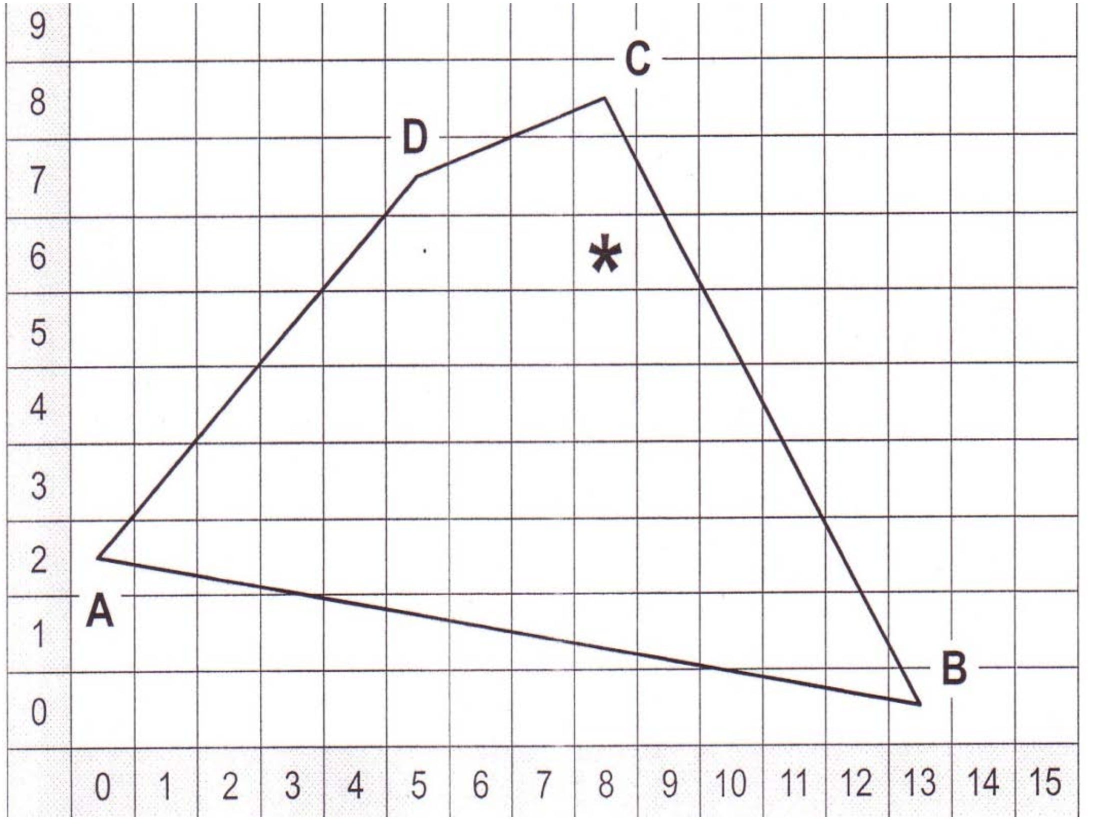
- Bei Bézier-Kurven haben die Stützpunkte _globalen_ Einfluss auf die Kurve.
- Bei B-Spline-Kurven haben die Stützpunkte _lokalen_ Einfluss auf die Kurve.
- Freiformflächen/-kurven, deren Stützpunkte auf der Fläche/Kurve liegen, nennt man _interpolierend_.
- Freiformflächen/-kurven, deren Stützpunkte nicht (alle) auf der Fläche/Kurve liegen, sondern die Fläche nur durch ihre Lage beeinflussen, nennt man _approximierend_.
- Die Hermite-Interpolation erfolgt mit Polynomen _3_. Grades.

# Fragen zu Kurven und Flächen

- Bei Bézier-Kurven haben die Stützpunkte lokalen Einfluss auf die Kurve.
- Freiformflächen, deren Stützpunkte auf der Fläche liegen, nennt man interpolierend.
- Bei B-Spline-Kurven haben die Stützpunkte lokalen Einfluss auf die Kurve.
- Freiformflächen, deren Stützpunkte nicht alle auf der Fläche liegen, sondern die Fläche/Kurve nur durch ihre Lage beeinflussen, nennt man approximierend.

# Beispiel Phong Interpolation + Schattierung

- Normalvektoren: **a**: (–0.5, –0.5, 2.0) **b**: (0.8, –0.2, 2.6)
  **c**: (1.0, 1.2, 1.8) **d**: (–1.3, 1.2, 2.0)
- Richtung zur Lichtquelle: (0, 3, 4)
- Blickvektor: (0, 0, –1)
- Intensität der Lichtquelle = 2.4
- $k_d = 0.6$, $k_s = 0.4$, $p = 10$
- Berechnen Sie die Schattierung an der Stelle * mit Phong-Interpolation und Phong-Schattierung



# Beispiel Phong Interpolation + Schattierung

$\text{Schattierung} = k_d \cdot I \cdot (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\ell}) + k_s \cdot I \cdot (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^p \quad = 0.6 \cdot 2.4 \cdot (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\ell}) + 0.4 \cdot 2.4 \cdot (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^{10}$

$\mathbf{n_1} = 1/5 \cdot \mathbf{a}/||\mathbf{a}|| + 4/5 \cdot \mathbf{d}/||\mathbf{d}||$

$\mathbf{n_2} = 2/8 \cdot \mathbf{b}/||\mathbf{b}|| + 6/8 \cdot \mathbf{c}/||\mathbf{c}||$

$\mathbf{n^*} = 1/5 \cdot \mathbf{n_1}/||\mathbf{n_1}|| + 4/5 \cdot \mathbf{n_2}/||\mathbf{n_2}||$

$\mathbf{n} = \mathbf{n^*}/||\mathbf{n^*}|| = \underline{(0.246, 0.388, 0.888)}$

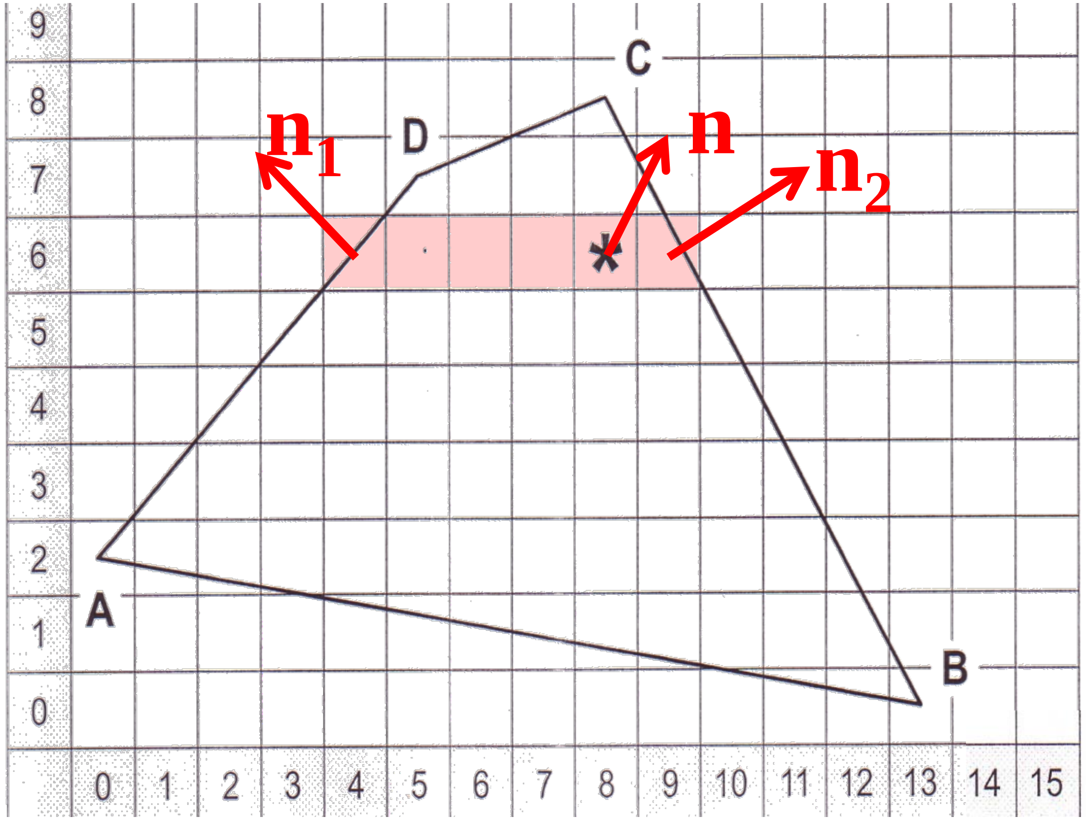
$\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\ell} = 0.943 \qquad (\mathbf{n} \cdot \mathbf{h})^{10} = 0.929^{10} = 0.479$

**<u>Schattierung = 1.818</u>**

$\boldsymbol{\ell} = (0, 3, 4)/||(0, 3, 4)|| = \underline{(0, 0.6, 0.8)}$

$\mathbf{v} = \underline{(0, 0, 1)}$

$$\mathbf{h} = \frac{\boldsymbol{\ell} + \mathbf{v}}{||\boldsymbol{\ell} + \mathbf{v}||} = \underline{(0, 0.304, 0.913)}$$




Richtung zur Lichtquelle: $(0, 3, 4)$
Blickvektor: $(0, 0, -1)$
Intensität der Lichtquelle $= 2.4$
$k_d = 0.6$, $k_s = 0.4$, $p = 10$